МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

УДК 621.43

https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-2-91-98

Оригинальное эмпирическое исследование

EDN: OUWFGB

Исследование рабочих режимов дизельного двигателя на биотопливе

В.А. Лиханов, О.П. Лопатин ✉

Вятский государственный агротехнологический университет, г. Киров, Российская Федерация

✉ nirs_vsaa@mail.ru

Аннотация

Введение. Современные исследования, направленные на снижение выбросов вредных веществ, образующихся в результате работы дизельных двигателей с использованием альтернативного топлива, подчеркивают их значимость и актуальность. Эта тема приобретает всё большую важность в контексте глобальных экологических изменений. Разработка и внедрение альтернативных источников энергии не только способствуют улучшению качества воздуха, но и помогают уменьшить зависимость от ископаемых топлив. Поэтому важно продолжать инвестировать в научные исследования и новые технологии, которые позволят добиться более чистого и эффективного использования ресурсов. На сегодняшний день известно множество таких исследований, особенно теоретических, проведённых в европейских и азиатских странах. Однако практически отсутствуют экспериментальные работы, посвящённые полусферическим камерам сгорания российских дизельных двигателей, у которых частота вращения, степень сжатия и другие конструктивные параметры существенно отличаются от аналогичных характеристик, описанных в известных исследованиях. Кроме того, нет практически никаких экспериментов, посвящённых процессу сгорания российских дизельных двигателей с неразделённой полусферической камерой сгорания в поршне, что обуславливает сложность процесса объемно-плёночного смесеобразования.

Целью работы является экспериментальное исследование мощностных и экономических показателей, параметров процесса сгорания дизельного двигателя с неразделённой полусферической камерой сгорания в поршне, работающего на этаноле и рапсовом масле (РМ). Исследование направлено на установление зависимостей, показывающих влияние различных режимов работы двигателя на указанные показатели, с целью определения их числовых характеристик.

Материалы и методы. Запуск дизельного двигателя осуществлялся на рапсовом масле, после чего включалась подача этанола, который заменял рапсовое масло до достижения установленного оптимального значения. Увеличение рабочего нагрузочного режима обеспечивалось регулированием подачи этанола. Для подачи рапсового масла был установлен дополнительный топливный насос высокого давления (ТНВД) 2УТНМ, а подача этанола производилась через стандартную систему топливоподачи.

Результаты исследования. Показатели процесса сгорания дизельного двигателя, работающего на этаноле и рапсовом масле, заметно отличаются от таковых у двигателя, функционирующего на дизельном топливе. При работе на этаноле и рапсовом масле наблюдается увеличение периода задержки воспламенения, что влияет на «жесткость» процесса сгорания и приводит к повышению значений величины P_z. Эти факторы, скорее всего, являются основными ограничениями для использования этанола посредством непосредственного впрыска. Одним из решений данной проблемы, предложенным в настоящей работе, является использование запального (пилотного) рапсового масла, которое позволяет корректировать параметры процесса сгорания, регулируя величину подачи запального топлива.

Обсуждение и заключение. Результаты проведенного экспериментального исследования подтверждают возможность полного замещения нефтяного моторного топлива в дизельном двигателе с неразделенной полусферической камерой сгорания в поршне альтернативным (возобновляемым) топливом, что, несомненно, решает важные вопросы экологической безопасности дизельных двигателей. Результаты исследования могут быть полезны как ученым, занимающимся данной темой, так и инженерно-техническим работникам машиностроительной отрасли.

© Лиханов В.А., Лопатин О.П., 2025

Ключевые слова: дизельный двигатель, этанол, рапсовое масло, цилиндр, процесс сгорания, давление, температура, частота вращения коленчатого вала

Благодарности. Авторы выражают благодарность Маркову Владимиру Анатольевичу, доктору технических наук, профессору, заведующему кафедрой Э-2 «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки» МГТУ им. Н.Э. Баумана; Сайкину Андрею Михайловичу, доктору технических наук, старшему научному сотруднику, главному специалисту Центра интеллектуальных систем ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»; Жолобову Льву Алексеевичу, кандидату технических наук, профессору, профессору кафедры эксплуатации мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин ФГБОУ ВО Нижегородский ГАТУ им. Л.Я. Флорентьева за консультации и помощь, оказанную при написании данной работы.

Для цитирования. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование рабочих режимов дизельного двигателя на биотопливе. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don).* 2025;25(2):91–98. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-2-91-98

Original Empirical Research

Study on Operating Modes of a Biofuel Diesel Engine

Vitaly A. Likhanov, Oleg P. Lopatin ✉
Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Russian Federation
✉ nirs_vsaa@mail.ru

Abstract

Introduction. Modern research aimed at reducing emissions of harmful substances resulting from the operation of diesel engines using alternative fuels emphasizes their importance and relevance. This topic is becoming increasingly significant in the context of global environmental changes. The development and implementation of alternative energy sources not only contribute to improving air quality, but also help reduce dependence on fossil fuels. Therefore, it is important to continue investing in research and new technologies that will provide for cleaner and more efficient use of resources. There are numerous such studies, specifically, theoretical ones, conducted in European and Asian countries. However, there are practically no experimental works devoted to hemispherical combustion chambers of Russian diesel engines, whose rotation speed, compression ratio and other design parameters differ significantly from similar characteristics described in known studies. In addition, there are practically no experiments devoted to the combustion process of Russian diesel engines with an undivided hemispherical combustion chamber in the piston, which determines the complexity of the volumetric-film mixing process. The research objective is an experimental study of the power and economic indicators, parameters of the combustion process of a diesel engine with an undivided hemispherical combustion chamber in the piston, running on ethanol and rapeseed oil (RO). The study is aimed at establishing dependences showing the effect of various engine operating modes on the specified indicators in order to determine their numerical characteristics.

Materials and Methods. The diesel engine was started using rapeseed oil, after which the ethanol supply was switched on, replacing the rapeseed oil until the set optimum value was reached. The increase in the operating load mode was provided through regulating the ethanol supply. An additional high-pressure fuel pump (HPFP) 2UTNM was installed to supply rapeseed oil, and ethanol was supplied through the standard fuel supply system.

Results. The indicators of the combustion process of a diesel engine running on ethanol and rapeseed oil differ from its regular diesel engine. When working with ethanol and rapeseed oil, an increase in the ignition delay period is noted, which affects the “rigidity” of the combustion process and results in a growth of P_z value. These factors are most likely the main limitations for the use of ethanol by direct injection. One of the solutions to this problem, proposed in this paper, is the use of ignition (pilot) rapeseed oil, which makes it possible to adjust parameters of the combustion process through controlling the amount of ignition fuel supply.

Discussion and Conclusion. The results of the conducted experimental study confirm the possibility of complete replacement of petroleum motor fuel in a diesel engine with an undivided hemispherical combustion chamber in the piston with an alternative (renewable) fuel. This undoubtedly solves important issues of environmental safety of diesel engines. The research results may be useful both to scientists working on this topic, and to engineers and technicians in the machine-building industry.

Keywords: diesel engine, ethanol, rapeseed oil, cylinder, combustion process, pressure, temperature, crankshaft speed

Acknowledgements. The authors would like to thank Vladimir Anatolyevich Markov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the E-2 Department “Combined Engines and Alternative Power Plants”, Bauman Moscow State Technical University; Andrey Mikhailovich Saikin, Dr.Sci. (Engineering), Senior Researcher, Chief Specialist of the Center of Information and Intelligent Systems, RF State Research Center “NAMI”; Lev Alekseevich Zholobov, Cand.Sci. (Engineering), Professor of the Department of Operation of Mobile Power Equipment and Agricultural Machinery, Nizhny Novgorod State Technical University named after L.Ya. Florentyev, for consultations and assistance provided in writing this paper.

For Citation. Likhanov VA, Lopatin OP. Study on Operating Modes of a Biofuel Diesel Engine. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(2):91–98. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-2-91-98

Введение. В краткосрочной и долгосрочной перспективах вопросы устойчивого развития и экологической безопасности в машиностроительной отрасли останутся крайне важными [1]. Например, в рамках программного пакета Европейский совет поставил перед собой задачу снизить выбросы углекислого газа не менее чем на 55 % к 2030 году по сравнению с 1990 годом, а к 2050 году достичь нулевого уровня выбросов CO_2. По последним прогнозам, к 2040 году около 75 % из 1,6 миллиарда легковых автомобилей, находящихся в эксплуатации, будут либо с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), либо с ДВС в составе гибридной системы [2]. Гибридные силовые установки, как с высоким, так и с низким уровнем электрификации в сочетании с современными ДВС, действительно могут обеспечить значительные преимущества на различных рынках, включая экологическую сферу [3]. Тем не менее, на сегодняшний день электрификация автотранспорта остается непростой задачей, обусловленной множеством как реальных, так и предполагаемых факторов. К числу этих факторов относятся ограниченный запас хода, нерегулярная инфраструктура зарядки, доступность полностью возобновляемых источников энергии в разных регионах, ограничения по спросу и трудности, связанные с добычей и переработкой редкоземельных и драгоценных металлов [4]. Для малотоннажных грузоперевозок электрификация может рассматриваться как приемлемая альтернатива ДВС, однако она все еще имеет углеродный след [5].

Обсуждаемые выше подходы к экологической безопасности в машиностроительной отрасли органично вписываются только в долгосрочную перспективу. В итоге намечается переход к использованию низкоуглеродного или безуглеродного топлива [6]. Что касается ближайшей перспективы и существующих на данный момент двигателей внутреннего сгорания, работающих на традиционном нефтяном моторном топливе [7], важно обсудить возможность применения альтернативного топлива как с точки зрения экологической безопасности, так и в контексте замещения топлива нефтяного происхождения [8]. Полагаем, что машиностроительная отрасль, являясь одним из основных источников загрязнения атмосферы, требует принципиальных изменений в подходах к использованию топлива [9]. Для реализации структурных изменений, направленных на улучшение экологических параметров в машиностроении, производителям оригинального оборудования и их партнерам стоит рассмотреть возможности технологических прорывов в модернизации существующих ДВС [10] и создании транспортных средств с низкими выбросами [11, 12].

С учетом высокой актуальности применения альтернативного топлива в дизельных силовых агрегатах, это обстоятельство заставляет ведущих машиностроителей обдумывать развитие технологий, способствующих применению различных альтернативных топлив в дизельных двигателях (ДД) [13]. Поиск новейших способов и перспективных технологий, направленных на улучшение экологических и энергетических показателей дизельных силовых установок, а также исследование конкуренции различных видов топлива (дизельное топливо, биотопливо, природный газ, спирты, эмульсии и др.) по показателям экологической эффективности может стать значительным шагом к активизации развития и применения альтернативных моторных топлив [14]. Переход к альтернативным топливам, не являющимся продуктами переработки нефти, будет наиболее перспективным направлением в борьбе за улучшение экологических показателей как для ДД, так и для автотранспорта машиностроительной отрасли [15, 16].

Наиболее перспективными в плане улучшения экологической безопасности ДД являются спирты и растительные масла [17]. В частности, при рассмотрении спиртов отдают предпочтение этанолу, который соответствует критериям доступности, простоты производства и, что наиболее важно, экологичности при сгорании [18]. С точки зрения авторов, наибольший интерес представляют растительные масла, среди которых лидирует рапсовое масло (РМ), обладающее отличными техническими характеристиками, такими как высокая энергетическая плотность и хорошая текучесть при низких температурах [19].

К настоящему времени было проведено немало актуальных научных работ, направленных на улучшение экологической безопасности ДД с использованием спиртов и растительных масел в качестве моторного топлива [20]. Однако следует отметить, что анализ результатов научных исследований демонстрирует отсутствие достаточных экспериментальных испытаний дизельных силовых установок рабочего объема до 5 л, работающих на этаноле и растительных маслах, проведенных с учетом взаимосвязи экологических и эксплуатационных показателей, а также определения содержания в отработанных газах NO_x, CH_x, CO, CO_2 и сажесодержания (С) [21]. Хотя эти вопросы достаточно широко освещены в литературе в теоретическом ключе с использованием различных современных форм моделирования, исследование данной проблемы лишь с теоретической точки зрения не помогает раскрыть некоторые критически важные аспекты, которые имеют значение для организации рабочего процесса ДД при использовании этанола и растительных масел [22].

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование мощностных и экономических показателей, а также параметров процесса сгорания дизельного двигателя с неразделенной полусферической камерой сгорания в поршне, функционирующего на этаноле и рапсовом масле, с установлением зависимостей влияния режимов его работы на указанные показатели и определением их числовых характеристик.

Материалы и методы. Для выполнения поставленной цели были проведены экспериментальные исследования ДД 2Ч 10,5/12,0 при работе на этаноле и РМ. Пуск ДД осуществлялся на РМ, далее включалась подача этанола и замещала РМ до установленного оптимального значения (цикловая подача была на уровне 13 мг/цикл, что соответствовало часовому расходу РМ 1,4 кг/ч). Увеличение рабочего нагрузочного режима обеспечивалось увеличением (регулированием) подачи этанола. Для подачи РМ был установлен дополнительный ТНВД, а подача этанола осуществлялась через штатную систему топливоподачи.

Для индицирования рабочего процесса дизеля использовался датчик давления PS-01, сигнал с датчика поступал на усилитель сигнала AQ05-A.1.001, усиленный сигнал поступал на ПК через аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) ЛА-2 USB. Датчик давления устанавливался во втулке, вмонтированной в головку цилиндра, согласно инструкции. Сигнал от датчика положения коленчатого вала М50 поступал на АЦП без усиления. Полученные данные обрабатывались при помощи специального алгоритма наложения массивов, затем по полученной осредненной индикаторной диаграмме по методике ЦНИДИ-ЦНИИМ, основанной на теории Вибе, определялись показатели процесса сгорания [23].

Результаты исследования. На рис. 1 представлены результаты определения осредненной индикаторной диаграммы при оптимальных установочных углах опережения впрыскивания топлива этанола и РМ, равных 34° до верхней мертвой точки (ВМТ) [15].

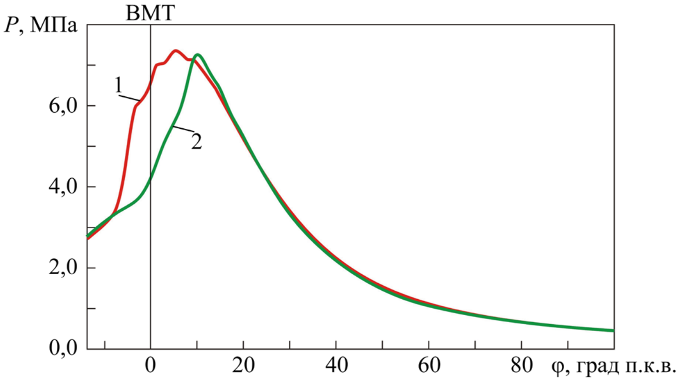

Рис. 1. Влияние угла положения коленчатого вала ДД на индикаторное давление:
1 — ДТ; 2 — этанол и РМ [22]

Из научной литературы исследователям хорошо известны ценные качества индикаторной диаграммы. Эта непосредственная запись действительного (индикаторного) давления в зависимости от угла положения коленчатого вала наглядно демонстрирует значение физической величины без необходимости производить какие-либо вычисления. По индикаторной диаграмме легко можно понять динамику протекания рабочего процесса и получить ценные сведения о значениях максимального давления сгорания P_z, периода задержки воспламенения (ПЗВ). Кроме того, индикаторная диаграмма является наглядным представлением динамики самовоспламенения в дизельном двигателе [22]. Таким образом, анализ индикаторных диаграмм, представленных на рис. 2, показывает, что при работе на этаноле и РМ наблюдается увеличение ПЗВ, при этом не отмечается значительного изменения максимального давления в цикле. Поскольку теплотворная способность этанола ниже, чем у ДТ, то необходимо компенсировать эту разницу, увеличив цикловую подачу топлива (рис. 2).

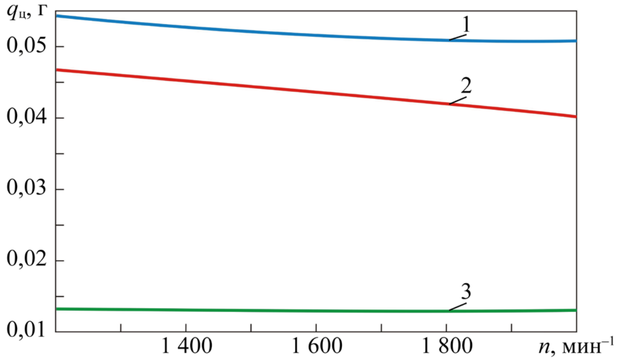

Рис. 2. Цикловая подача топлива: 1 — этанол; 2 — ДТ; 3 — РМ [11]

https://vestnik-donstu.ru

Рассматривая режим номинальной частоты вращения (n = 1 800 мин$^{-1}$), отметим, что подача РМ составляла 13 мг за цикл, тогда как подача этанола достигала 52 мг/цикл (рис. 2). На дизельном режиме цикловая подача составила 43 мг/цикл.

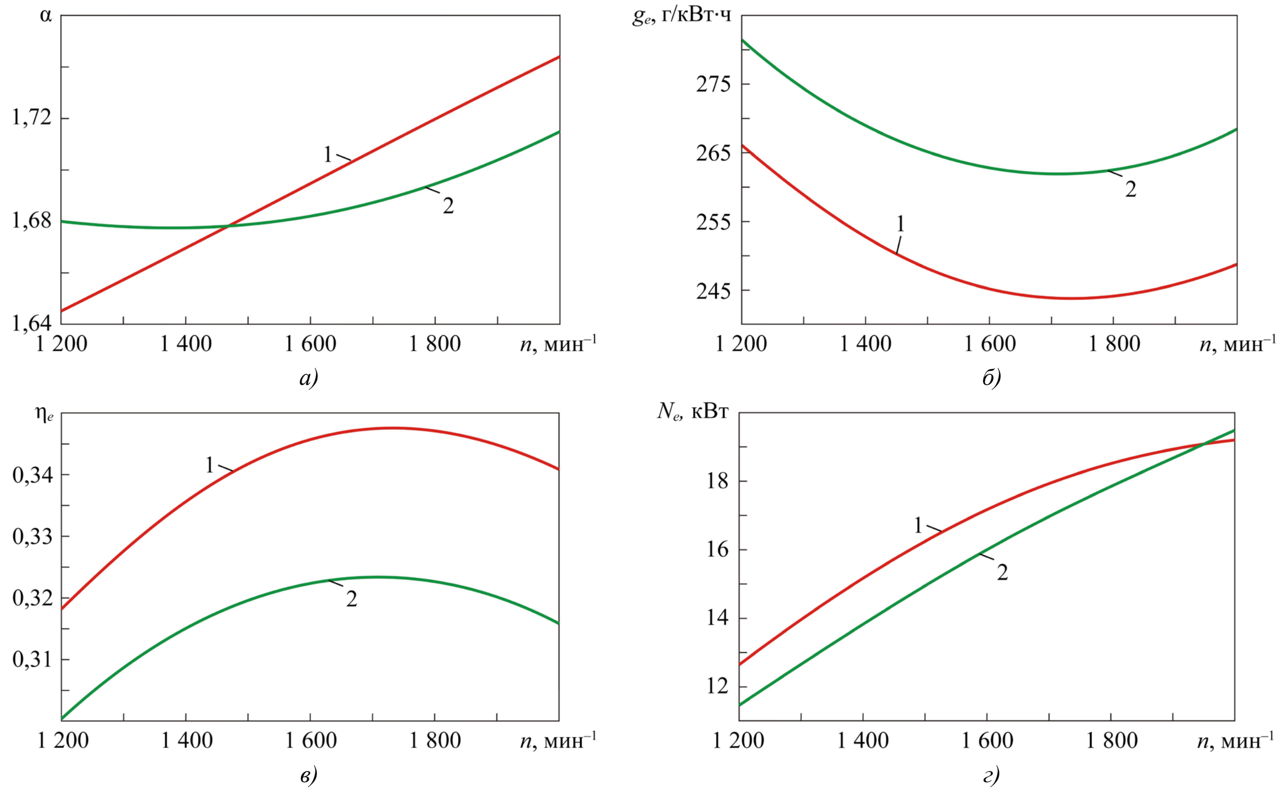

Рис. 3. Эффективные показатели работы ДД: *а* — коэффициент избытка воздуха; *б* — удельный эффективный расход топлива; *в* — эффективный КПД; *г* — эффективная мощность; 1 — ДТ; 2 — этанол и РМ [11]

При работе на этаноле и РМ увеличение потребления топлива снижает эффективный КПД, особенно на малых частотах вращения, что не может не сказаться на эффективной мощности и приводит к некоторому её снижению (рис. 3 *г*), а на пиковых значениях мощностные показатели и характеристики процесса сгорания (рис. 4 *а*) при работе ДД на этаноле и РМ уже превышают значения ДТ.

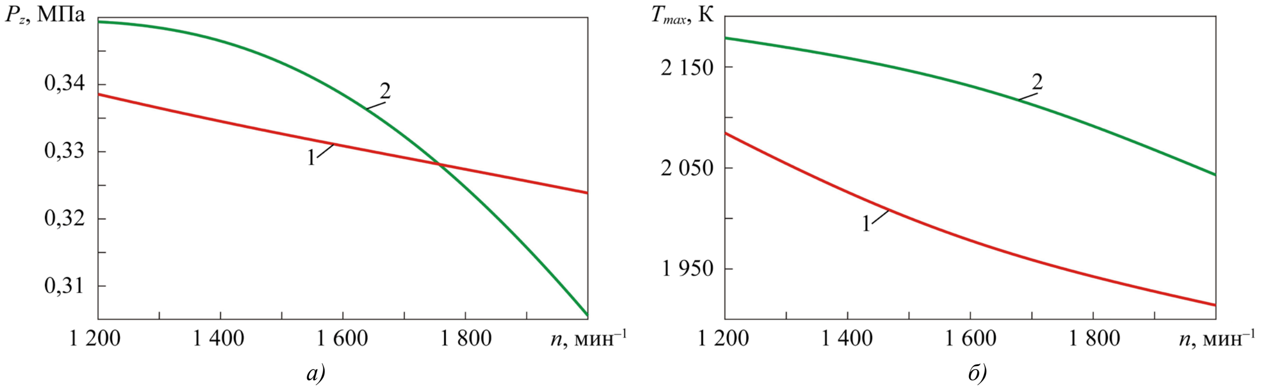

Рис. 4. Показатели процесса сгорания ДД: *а* — максимальное давление сгорания; *б* — максимальная осредненная температура; 1 — ДТ; 2 — этанол и РМ [15]

Анализируя графические зависимости, изображенные на рис. 4, следует отметить, что на небольших частотах вращения работы ДД на этаноле и РМ P_z равняется 8,2 МПа, а при меньшей частоте вращения составляет 6,5 МПа. Значения T_{max} при этом также снижаются, но остаются выше значений работы ДД на ДТ. По-видимому, этот рост обусловлен более высоким ПЗВ ДД при работе на этаноле и РМ, поскольку за больший период времени смешиваясь с воздухом испаряется большее количество топлива. Это, в свою очередь, приводит к росту интенсивности процессов выделения тепла в кинетической фазе сгорания и увеличению T_{max} с достижением своих максимальных значений на более поздних углах. Так, при работе ДД на этаноле и РМ горение начинается позже примерно на 4–7 градусов в сравнении с работой на ДТ [15].

На рис. 5 представлены характеристики токсичности отработавших газов (ОГ) ДД на номинальной частоте вращения.

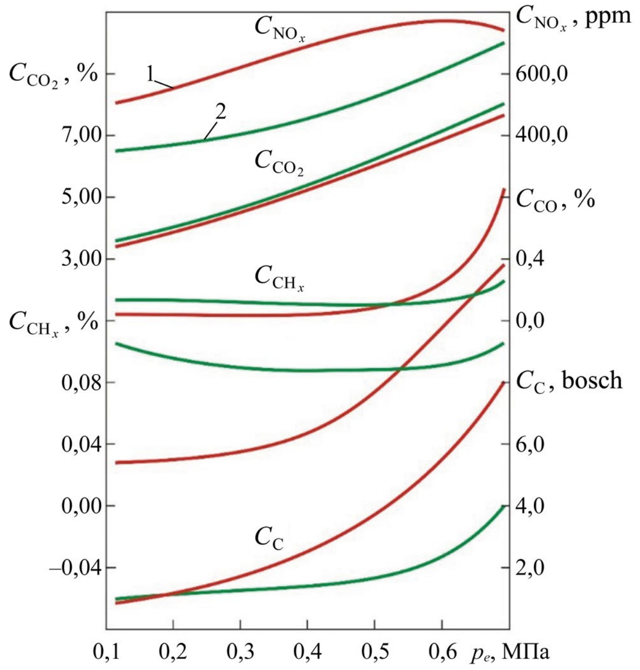

Рис. 5. Показатели токсичности ОГ ДД (n = 1800 мин$^{-1}$): 1 — ДТ; 2 — этанол и РМ

Результаты экспериментальных исследований токсичности ДД показывают, что применение этанола и РМ приводит к снижению в исследуемых режимах концентрации оксидов азота (NO_x), диоксида углерода (CO_2) и сажи (С). На нагрузках выше средних происходит снижение концентрации оксида углерода (СО) и углеводородов (CH_x).

Числовые значения результатов экспериментальных исследований токсичности ДД на номинальном режиме работы сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты исследований показателей токсичности и дымности ОГ ДД 2Ч 10,5/12,0
при работе на этаноле и РМ (n = 1 800мин$^{-1}$, p_e = 0,588 МПа)

Топливо	Показатели			
	NO_x, ppm	С, ед. по шкале bosch	CH_x, %	СО, %
Дизельное	790	5,3	0,11	0,22
Этанол +РМ	590 (снижение на 25,3 %)	2,2 (снижение в 2,4 раза)	0,09 (снижение на 18,2 %)	0,14 (снижение на 36,4 %)

Обсуждение и заключение. Анализируя полученные результаты рассмотренных экспериментальных исследований, следует отметить, что показатели процесса сгорания ДД, работающего на этаноле и РМ, отличаются от его штатного, работающего на ДТ. Особенно при использовании этанола и РМ наблюдается увеличение площади зоны влияния (ПЗВ), что не может не оказать значительного влияния на «жесткость» процесса сгорания и приведет к увеличению значений величины P_z. Эти аргументы, по всей видимости, являются основными сдерживающими факторами применения этанола с помощью непосредственного впрыскивания. Одним из возможных решений данной проблемы, предложенным в данной работе, является использование запального (пилотного) РМ, который позволяет корректировать параметры процесса сгорания, управляя величиной подачи запального топлива. При этом стоит пояснить, что величина запального РМ изменялась до определённого значения (указано выше в работе), при котором достигались необходимые характеристики параметров сгорания. После этого величина РМ фиксировалась, а изменение нагрузочных режимов ДД обеспечивалось необходимой подачей этанола. Специалистам понятно, что таким образом решается задача лишь в частном случае. В дальнейшей научной работе необходимо будет внедрить динамическую корректировку как величины запальной порции РМ, так и угла опережения впрыскивания топлива. Это будет способствовать дальнейшей оптимизации системы топливоподачи и организации процесса сгорания в целом. Тем не менее, подводя итог, отметим, что в данной работе решены вопросы улучшения эксплуатационных характеристик ДД за счёт применения биотоплива с установлением характерных зависимостей влияния рабочих режимов на эффективность и определением их числовых значений. Причём эффективность предложенного решения подтверждается полным замещением нефтяного моторного топлива альтернативным (возобновляемым).

Список литературы/ References

1. Kavtaradze RZ, Onischenko DO, Golosov AS, Zelentsov AA, Chen Zh, Sakhvadze GZh. The Influence of the "Piston Heat Belt–Sleeve" Gap on Heat Exchange in the Combustion Chamber of an Engine Depending on the Fuel Utilized. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2022;51(2):112–120. https://doi.org/10.3103/S1052618822010046

2. Кулагин В.А., Грушевенко Д.А., Галкина А.А. Прогноз развития энергетики мира и России до 2050 года. *Современная мировая экономика*. 2024;2(1):6–22. https://doi.org/10.17323/2949-5776-2024-2-1-6-22

Kulagin V, Grushevenko D, Galkina A. Global and Russian Energy Outlook Up to 2050. *Contemporary World Economy*. 2024;2(1):6–22. https://doi.org/10.17323/2949-5776-2024-2-1-6-22

3. Sens M. Hybrid Powertrains with Dedicated Internal Combustion Engines are the Perfect Basis for Future Global Mobility Demands. *Transportation Engineering*. 2023;13:100146. https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100146

4. Beltrami D, Iora P, Uberti S, Tribioli L. Electrification of Compact Off-Highway Vehicles – Overview of the Current State of the Art and Trends. *Energies.* 2021;14(17):5565. https://doi.org/10.3390/en14175565

5. Вохмин Д.М., Козин Е.С. Основы мониторинга углеродного следа транспортных потоков крупных городов. *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. 2024;(6):11–17.

Vokhmin DM, Kozin ES. Basics of Monitoring the Carbon Footprint of Traffic Flows in Large Cities. *Transport: Science, Equipment, Management. Scientific Information Collection.* 2024;(6):11–17.

6. Fangyuan Zheng, Haeng Muk Cho. The Effect of Different Mixing Proportions and Different Operating Conditions of Biodiesel Blended Fuel on Emissions and Performance of Compression Ignition Engines. *Energies*. 2024;17(2):344. https://doi.org/10.3390/en17020344

7. Mateichyk V, Kryshtopa S, Kryshtopa L, Smieszek M, Kostian N, Mosciszewski J, et al. Research of Energy Efficiency and Environmental Performance of Vehicle Power Plant Converted to Work on Alternative Fuels. *Machines*. 2024;12(5):285. https://doi.org/10.3390/machines12050285

8. Марков В.А., Девянин С.Н., Са Б., Нормуродов А.А. Исследование работы дизельного двигателя на смесевых и эмульгированных биотопливах с добавками рапсового масла. *Двигателестроение*. 2023;(1(291)):70–90. https://doi.org/10.18698/jec.2023.1.70-90

Markov VA, Devyanin SN, Bowen Sa, Normurodov AA. Investigation of the Operation of a Diesel Engine on Blended and Emulsified Biofuels with Rapeseed Oil Additives. *Dvigatelestroyeniye (Engines Construction)*. 2023;291(1):70–90. https://doi.org/10.18698/jec.2023.1.70-90

9. Keunsang Lee, Haeng Muk Cho. Effects of Castor and Corn Biodiesel on Engine Performance and Emissions under Low-Load Conditions. *Energies*. 2024;17(13):3349. https://doi.org/10.3390/en17133349

10. Kavtaradze RZ, Kondratev AM, Rongrong Ch, Citian Ch, Baigang S, Sakhvadze GZh. Local Heat Exchange in the Combustion Chamber of a Hydrogen Engine Running on a Lean Fuel Mixture. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021;50(1):79–87. https://doi.org/10.3103/S105261882101012X

11. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование скоростных режимов рабочего процесса дизельного двигателя на биотопливе. *Двигателестроение*. 2024;296(2):75–83.

Likhanov VA, Lopatin OP. High-Speed Operation Modes of a Biofuel Diesel Engine. *Dvigatelestroyeniye (Engines Construction)*. 2024;296(2):75–83.

12. Rathinavelu V, Kulandaivel A, Pandey AK, Bhatt R, De Poures MV, Hossain I, et al. Production of Green Hydrogen from Sewage Sludge/Algae in Agriculture Diesel Engine: Performance Evaluation. *Heliyon*. 2024;10(1):e23988. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e23988

13. Zheliezna T, Drahniev S. Comparative Analysis of Biodiesel and Renewable Diesel as Motor Fuels. *Journal of Science. Lyon.* 2024;57:34–39. https://doi.org/10.5281/zenodo.13694682

14. Kovbasenko S. Possibilities of Enhancing the Environmental Safety of Diesel Vehicles Using Alternative Fuels. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*. 2023;16(2):51–57. https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-16-2-51-57

15. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование процесса сгорания в тракторном дизеле при работе на спирте и растительном масле. *Тракторы и сельхозмашины*. 2023;90(3):191–200. https://doi.org/10.17816/0321-4443-320931

Likhanov VA, Lopatin OP. Research of the Combustion Process in a Tractor Diesel Engine When Operating on Alcohol and Vegetable Oil. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2023;90(3):191–200. https://doi.org/10.17816/0321-4443-320931

16. Jurj S, Werner T, Grundt D, Hagemann W, Möhlmann E. Towards Safe and Sustainable Autonomous Vehicles Using Environmentally-Friendly Criticality Metrics. *Sustainability*. 2022;14(12):6988. https://doi.org/10.3390/su14126988

17. Lindemberg De Jesus Nogueira Duarte, Gilson Medeiros, Humberto Neves Maia De Oliveira, Eduardo Lins De Barros Neto, Rayandson Raimundo Da Silva, Jessyca Bezerra. Evaluation of the Effect of Ethyl Alcohol Content in a Ternary Ethanol/Biodiesel/Diesel System. *International Journal of Thermodynamics*. 2024;27(2):19–26. https://doi.org/10.5541/ijot.1372558

18. Krakowski R, Witkowski K. Investigating the Effects of Environmentally Friendly Additives on the Exhaust Gas Composition and Fuel Consumption of an Internal Combustion Engine. *Applied Sciences*. 2024;14(7):2956. https://doi.org/10.3390/app14072956

19. Долуда В.Ю., Лакина Н.В., Бровко Р.В., Сульман М.Г. Исследование оптимальных физико-химических параметров каталитической трансформации этанола и изопропанола в ароматические углеводороды. *Вестник Тверского государственного университета. Химия*. 2024;57(3):76–85. https://doi.org/10.26456/vtchem2024.3.7

Doluda VYu, Laskina NV, Brovko RV, Sulman MG. Investigation of Optimal Physico-Chemical Parameters of the Catalytic Transformation of Ethanol and Isopropanol into Aromatic Hydrocarbons. *Herald of TvSU. Series: Chemistry*. 2024;57(3):76–85. https://doi.org/10.26456/vtchem2024.3.7

20. Кривенко Д.А., Логвинов А.Ю., Ишков А.В. Исследование рабочего процесса автотракторных дизелей Минского моторного завода на режиме максимальной мощности при использовании альтернативного биотоплива. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2024;233(3):75–84. https://doi.org/10.53083/1996-4277-2024-233-3-75-84

Krivenko DA, Logvinov AYu, Ishkov AV. Investigation of Operating Process of Automotive Diesel Engines of the Minsk Motor Plant in Maximum Power Mode Using Alternative Biofuel. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2024;233(3):75–84. https://doi.org/10.53083/1996-4277-2024-233-3-75-84

21. Цапенков К.Д., Кураева Ю.Г., Сидорова Е.И., Штырлов А.Е., Зубрилин И.А. Влияние состава топлива на образование сажи в двигателях и энергоустановках. *Физика горения и взрыва*. 2024;60(4):63–75. https://doi.org/10.15372/FGV2023.9430

Tsapenkov KD, Kuraeva YuG, Sidorova EI, Shtyrlov AE, Zubrilin IA. Effect of Fuel Composition on Soot Formation in Engines and Power Plants. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2024;60(4):63–75. https://doi.org/10.15372/FGV2023.9430

22. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Исследование сажевыделения в тракторном дизеле, работающем на биотопливе. *Тракторы и сельхозмашины*. 2024;91(4):375–385. https://doi.org/10.17816/0321-4443-625783

Likhanov VA, Lopatin OP. Investigation of Carbon-Black Emissions of a Tractor Biofuel Diesel. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(4):375–385. https://doi.org/10.17816/0321-4443-625783

23. Likhanov VA, Kozlov AN, Araslanov MI. Investigation of the Portion Size of Rapeseed Oil for Ethanol Ignition in a Diesel Engine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2020;548:62053. https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/6/062053

Об авторах:

Виталий Анатольевич Лиханов, доктор технических наук, профессор, заведующий, кафедра «Тепловые двигатели автомобили и тракторы» Вятского государственного агротехнологического университета (610017, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский пр., 133), SPIN-код, ORCID, ScopusID, lihanov.va@mail.ru

Олег Петрович Лопатин, доктор технических наук, доцент, профессор, кафедра «Тепловые двигатели автомобили и тракторы» Вятского государственного агротехнологического университета (610017, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский пр., 133), SPIN-код, ORCID, ScopusID, nirs_vsaa@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

В.А. Лиханов: разработка концепции, научное руководство.

О.П. Лопатин: написание черновика рукописи, визуализация.

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Vitaly A. Likhanov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Thermal Engines of Automobiles and Tractors, Vyatka State Agrotechnological University (133, Oktyabrsky Ave., Kirov, 610017, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, nirs_vsaa@mail.ru

Oleg P. Lopatin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Thermal Engines of Automobiles and Tractors, Vyatka State Agrotechnological University (133, Oktyabrsky Ave., Kirov, 610017, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, ScopusID, nirs_vsaa@mail.ru

Claimed Contributorship:

VA Likhanov: conceptualization, supervision.

OP Lopatin: writing – original draft preparation, visualization.

Conflict of Interest Statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 20.03.2025
Поступила после рецензирования / Reviewed 18.04.2025
Принята к публикации / Accepted 24.04.2025